



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	離散要素型解法による高炉の数値解析
Author(s)	夏井, 俊悟
Citation	混相流, 30(2), 166-173 https://doi.org/10.3811/jjmf.30.166
Issue Date	2016-06-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/76010
Rights	著作権は日本混相流学会に帰属する
Type	journal article
File Information	Konsoryu Vol.30 No.2 112.pdf



離散要素型解法による高炉の数値解析*

Numerical Analysis of Blast Furnace by Discrete Element Type Model

夏井 俊 悟**

NATSUI Shungo

Abstract Ironmaking process is currently focused on the decreased reducing agent operation of a blast furnace in order to decrease CO₂ emissions. Because the coke ratio is reduced in this operation, causing a huge pressure drop, it has become increasingly important to understand the in-furnace phenomena using the non-empirical method. The discrete element method (DEM), Euler-Lagrange coupling method (DEM-CFD), and fully-Lagrangian method (e.g. SPH, MPS) simulation were carried out to analyze the momentum, heat and mass transfer between the fluid and the particles in a packed bed. These developed numerical methods are using discrete element type model, which can track the movement of the solid or the fluid phase directly. The optimum bed structure for decreased reducing agent operation can be clarified by application of these methods. Moreover, three-dimensional information for understanding in-furnace local flow structure can be also obtained with high spatial resolution. This paper explains the outline of the latest numerical model of blast furnace.

Keywords: Blast furnace, Discrete element method, Euler-Lagrange coupling, Packed bed, Trickle flow

1. はじめに

本特集で紹介されたとおり、製鉄プロセスとは、炭素を還元材として鉄鉱石中の酸化鉄成分の還元・溶融を行う工程である。Fig. 1 に高炉内各現象について模式的に示す。現在の主な製鉄用高炉は、内容積 5000 m³ 程度の大型円筒容器であり、鉄鉱石は一般に焼結鉱やペレットに加工され、炭素成分もコークスとして成形されることで、炉上部から交互に装入され、炉内に層状の充填層を形成する。下部炉壁に設置された数十本のノズル(羽口)から高温空気と補助燃料を高速に導入することで、raceway とよばれる空間が生成する。炭素燃焼によって発生した熱量およびCOガスは炉上部方向を主流とする気相の流れによって炉上

部へと移動し、鉱石の還元および昇温に寄与する。炉内の原燃料消費に伴って層状充填層は比較的低速で炉内を降下し、固相線温度以上に達すると鉱石が固液共存状態となり軟化することで融着帯が形成される。さらに下部では、鉱石の鉄成分および脈石成分は液相線温度をこえて完全に溶融し、それぞれ溶鉄と溶融スラグを生成する。これら高温融体は各種反応を生じながらコークスベッドを滴下すると予測されるが、一方で充填層空隙を占有し、通気性を著しく低下する原因となっている。このように高炉内は非常に広い温度分布が生じるため、コークスガス化・溶融による相変化、鉱石の還元による組成不均一性、粉体の発生など多くの原因によって炉内は固気液相が混

* 2016. 5. 2 受付

** 北海道大学大学院工学研究院材料科学部門 〒060-0907 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目
TEL: (011)706-6342 FAX: (011)706-6342 E-mail: natsui@eng.hokudai.ac.jp

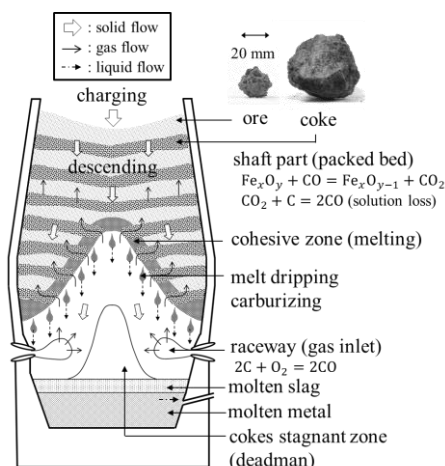


Fig. 1 Schematic diagram of multi-phase flow in ironmaking blast furnace.

在する系となる。

さらに近年では、地球温暖化問題を背景とした CO₂ 排出量削減を目標に製鉄プロセス全体系の見直しが図られ、低コークス比操業、還元材の水素置換、高反応性原料の使用などが提案されている[1]。これらの方法は熱力学的には CO₂ 排出量削減が可能と見積られるが、炉内通気性や温度・反応場にも大きな影響を与えることが予想されている。炉内の力学的な変動により流れが停滞する場合には連続操業が困難となるため、現在では CO₂ 排出量削減には炉内の力学的変化にも対応する技術開発が同時に要求されている。

炉内の力学的挙動を理解する手段として、大きく分けて実験的手法と数値的手法があり、互いに相補的な関係にある。近年では、高感度ハイスピードカメラや X 線 CT を用いた直接観察により、粉体や液滴など分散相挙動の素過程をより詳細に理解できるようになった[2]。一方では、計算機の処理速度と容量の向上を背景に、種々の現象に対応した様々な計算手法が開発され、各素過程の保存式から実測可能な物理量を予測し、実験値と比較できるようになってきており[3-5]、充填層を通過する流体運動について有意な時空間情報が得られている。本稿では、離散要素法(DEM)や Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法に代表される分散相運動解析に有用な離散要素型の数値計算に焦点をあて、近年の製鉄プロセスへの応用展開および今後の発展について解説する。

2. DEM による充填構造シミュレーション

2.1 DEM の計算方法

DEM は、固体粒子群が存在する系において、接触粒子間相互作用を計算し、各粒子の運動を追跡する計算手法である。連続体力学の概念を必要とせず、連続体シミュレーションとは本質的に異なる手法である[6]。DEM には、剛体球モデルと軟体球モデルがあるが、充填層では多体接触が近似できる軟体球モデルを対象とする。Fig. 2 a) に粒子間に働く接触力の模式図を示す。軟体球モデルでは、粒子間接触力の計算に対して粒子間の若干の重なりから粒子間反発力を与え、粒子を相互に反発させ、粒子群を構成する個々の粒子座標を時間発展的に決定していく。各粒子運動は、並進および回転運動の運動方程式を支配方程式に流体抗力項 $\mathbf{F}_f$ を付加して与えられる。

$$\text{translational} : m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_{j \neq i}^N \mathbf{F}_c + m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_f \quad (1)$$

$$\text{rotational} : I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \mathbf{r}_i \sum_{j \neq i}^N (\mathbf{F}_{cs} + \mathbf{F}_r) \quad (2)$$

接触二粒子間にはバネとダッシュポットおよび摩擦スライダーが並列して接続されており、接触力 $\mathbf{F}_c$ に対して、Hertz の弾性接触理論に基づいて適切な各定数 k , η , μ および回転抵抗力 $\mathbf{F}_r$ を付与することによって正確に粒子群の挙動を追跡できる。

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{F}_{cn} + \mathbf{F}_{cs} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{cn} = -k_n l_n - \eta_n \mathbf{v}_{cs} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{cs} = \begin{cases} -k_s l_s - \eta_s \mathbf{v}_{p,s} (|\mathbf{F}_{cs}| < \mu |\mathbf{F}_{cn}|) \\ \mu |\mathbf{F}_{cn}| (|\mathbf{F}_{cs}| > \mu |\mathbf{F}_{cn}|) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 l は有限の時間刻み幅における変位増分である。

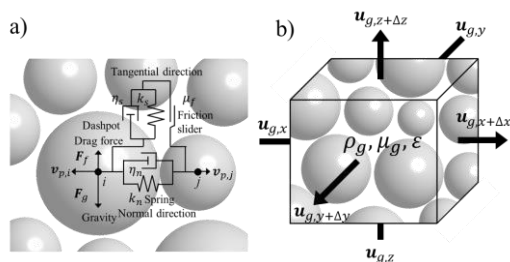


Fig. 2 Schematic diagrams of fixed volume element through which a fluid is flowing in packed bed. Particle-particle interaction force is calculated by the spring-dashpot system.

なお、 $\mathbf{F}_f$ を計算する場合には、充填層間隙を流れる流体運動を考慮する必要がある。ところで、流体が流れている領域の1点に着目し、その位置における物理量の時間に対する変化を観察するのは Euler 的方法、流体を流れる要素ととらえ、それらの動きを観察するのは Lagrange 的方法と呼ばれるが、差分法や有限要素法などの空間をメッシュで分割する方法は Euler 的、DEM などの粒子法は Lagrange 的である。粒子スケール以下の流れを計算するためにはより小さな計算セルを用いる必要があるが、大規模演算を行ったとしても計算領域がかなり限定される。そこで Tsuji et al. は、粒子よりも大きい寸法を有する計算セル内で粒子情報を平均化する数値解析法(DEM-CFD)を提唱し[7]、現在では一般的に用いられるモデルとなっている[8-12]。Fig. 2b)に示すように、空間に固定した検査体積内における粒子体積を求めることにより、気相率(空隙率)を ε とおけば各々独立した相の流れを共通の計算セルで解くことができる。複数の相が存在する流れの記述に Euler と Lagrange の二つの視点を連成するため、このアプローチは、Euler-Lagrange(E-L)法と呼ばれる。一般に流体の速度と圧力は、非圧縮性、Newton 流体の仮定により、連続の式と Navier-Stokes 式を SIMPLE 法や SMAC 法などを用いて解ける。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_g) + \nabla \cdot (\varphi_g \mathbf{v}_g) = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varphi_g) + \nabla \cdot (\varphi_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) \\ = -\varepsilon \nabla p_g + \varphi_g \nabla^2 \mathbf{v}_g + \varphi_g \mathbf{g} + \mathbf{F}_p \end{aligned} \quad (7)$$

この方法においては、セル内の粒子運動を平均化するにもかかわらず、個々の粒子運動が厳密に計算されるため、充填構造特性をかなり反映することができる。粒子-流体間相互作用を介した弱連成になっているため、精度良く $\mathbf{F}_f$, $\mathbf{F}_p$ を求めることが重要である。モデル式に関しては、詳細な解説書があるので参考に使いたい[13-15]。

2.2 DEM による充填層の力学計算例

高炉を特徴付ける原料の充填層構造は、数億個粒子(当然、無数の粉体は除くが)から形成され、これらによって炉内の流路の大部分が決定されると言っても過言ではない。DEM の観点では粒状体としての特性から巨視的な充填構造を再現することに意味があり、すべて粒子の位置・速度・

応力情報が追跡される。充填層を形成する粒子群を DEM によって解析した例を Fig. 3 に示す。計算負荷低減のため粒子径を大きく近似し、代表的な挙動を再現する粗視化モデルを採用した[14]。装入された原料粒子群は、単純に層状構造を形成するだけでなく、装入時の転動、降下に起因した変動、および異なる粒径に起因した混合が同時に生じている。また、充填層下部では法線応力が大きい粒子のネットワーク構造が表れており、特に raceway 上部でアーチ状の応力場が炉内全体の荷重を支える形態となっている。raceway 付近のすべりを伴う粒子によってその周りの応力場が支配され、下部においても荷重があまりかからない粒子が存在するのが興味深い。一方では、コークス圧壊強度を超える可能性がある 2.0 MPa 以上の応力を示す粒子が存在する。応力場の不均一性は粒子粗視化近似の影響、すなわち実験での粒径分布を再現していないため未だ検証の余地があるものの、炉内通気性に影響を与えるコークス圧壊による粉化量を議論できる可能性を示している。

2.3 Euler-Lagrange 法による熱物質移動計算

前述のように高炉の低炭素化へのアプローチとして、コークスの混合装入や高反応性コークスの使用が模索されているが[1]、適切な操業設計指針を得るために、粒子層の局所的な伝熱・反応挙動の非経験的な予測が求められている。E-L 法によって熱および物質移動を同時に解くことができれば、プロセス全体の収支を把握すると同時に粒子スケールでの収支を理解することができ、上述の操業設計に役立つ[16]。しかも E-L 法においては、粒子単位の不連続現象要因を組み込むことが容易である[17]。気相中にある単一粒子の伝熱形態を固-気間対流伝熱 Q_{conv} 、粒子間接触伝熱 Q_{cond} 、放射伝熱 Q_{rad} の3つに分類し、さらに粒子の化学反応による熱生成 Q_{reac} を考慮して、粒子に関する熱伝導方程式が得られる。

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_g}{dt} = Q_{reac} - \left(\sum_{j \neq i}^N Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \right) \quad (8)$$

一方、粒子群中の流体の伝熱は、粒子-流体間相互作用を考慮して、Energy 方程式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_g C_{p,g} T_g) + \nabla \cdot (\varphi_g \mathbf{v}_g C_{p,g} T_g) = \varepsilon \lambda_g \nabla^2 T_g + Q_p \quad (9)$$

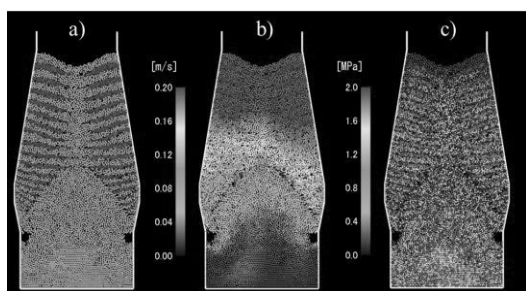


Fig. 3 Calculated burden layers formation by DEM. a) burden distribution, red particle shows ore and gray particle shows coke, b) particles velocity distribution, c) normal stress distribution. [18]

式(8)、(9)は、それぞれの伝熱形態に対するモデル式を与えることで比較的容易に解くことができる。ただし、粒子温度一定と仮定する場合は粒子内伝熱速度が十分大きい場合に限る、適切な伝熱モデルを与えるなどの注意が必要である。物質移動に関しても同様に導くことができる。固相の物質輸送方程式は、粒子が Lagrange 的に輸送されるので、組成 i の化学反応による生成または消失を考慮して、以下のように表される。

$$\frac{\partial \psi_{s,i}}{\partial t} = S_{s,i} \quad (10)$$

ここで、 ψ_i は組成 i の質量分率、 S_i は組成 i の生成速度である。一方、気相化学種の輸送は下記のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi_g \psi_{g,i}) + \nabla \cdot (\varphi_g \mathbf{v}_g \psi_{g,i}) = \varepsilon \Gamma_{g,i} \nabla^2 \psi_{g,i} + S_{g,i} \quad (11)$$

ここで、粒子と気相の反応速度である solution loss 反応: $C(s) + CO_2(g) = 2CO(g)$ に対しては、化学反応と物質移動の複合律速であることを仮定して、粒子表面に吸着された分子同士の反応である Langmuir-Hinshelwood 触媒反応機構の化学反応速度を粒子内まで拡張して用いることができ、また、焼結鉱と気相の反応速度は、焼結鉱内部の気孔率が十分小さいと仮定して表面から段階的に還元が進行すると仮定すれば、多界面未反応核モデルを適用できる[5]。

Fig. 4 は高炉全体を対象とした計算結果である。高炉全体の運動量・熱・物質分布についてマクロスケールでの設計が検討できる。一方、粒子配置の不均一性の影響は、粗視化近似のため情報が平均化された結果となっている。Fig. 5 は、実粒子

径を採用し、2M 粒子を対象とした計算結果である。層状構造では、高さ方向上部ほど、また径方向に壁方向ほど還元率が高いが、混合構造では、壁付近以外で明らかな反応率空間不均一性が生じている。異粒径混合によって粒子間温度勾配が大きくなったことが理由であり、大きい吸発熱を伴う不均一系において、壁効果や局所的偏流の影響は顕在化する傾向にある。より反応速度の速い粒子が用いられる場合、その配置設計において、従来の均質充填構造を仮定したモデリングは正確で十分な情報を与えない。その適切なモデリングは、粒子表面反応を考慮したフルスケールシミュレーションであり、詳細な反応素過程の積分によって実現できる[19-24]。Wehringer et al.は固定層を対象とした CFD 解析により、113 個の粒子の触媒作用と周辺の流れの相互作用について解析

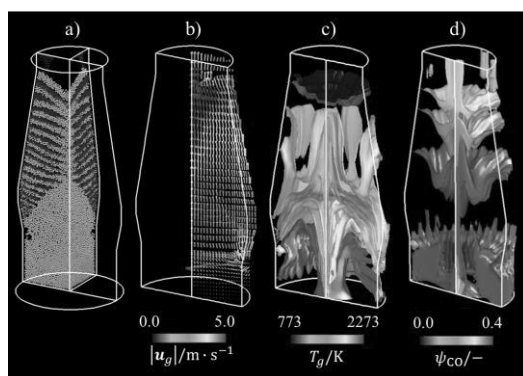


Fig. 4 Results of the Euler-Lagrange coupled blast furnace model. a) burden distribution, b) gas velocity vectors, c) gas temperature distribution, d) CO volume fraction distribution [18].

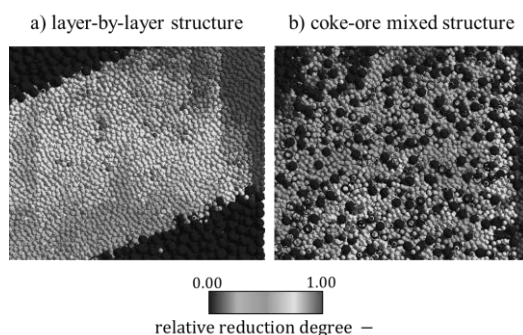


Fig. 5 Reduction degree distribution in vertical cross section of packed bed. Blue particles shows coke [18].

し、適切な管径-粒径比を求めている [25,26]。今後は詳細なマルチスケール解析により、粒子配置設計による低炭素化の実現可能性について検討することが望まれる。

3. 離散要素型解法による分散液相流動解析

本特集で植田と昆が詳説しているとおり[27]、高炉では主に下部において大きな圧力損失が生じる。還元と加熱が進行することにより発生する融体の滴下が通気のための空隙を占有することが原因とされ、低コークス比条件でより顕在化するといわれている。よって高炉内充填層における通気・通液性を最適化するため、液相の滴下条件を明らかにする必要がある、近年では、熔融金属、熔融スラグを対象とした CFD による界面形状追跡の試みが継続されている[28,29]。

本問題のように連続体が大きく変形・分散する場合、計算領域内に構造格子を設定して流れを格子点上で観測するよりも、要素に分割してその要素を追跡して流れを観測するほうが有利な場合がある[30]。Fig. 6 に充填層中を滴下する融体運動解析の模式図を示す。Euler 的手法では、多量の分散液相が格子間を横切の場合、数値的な拡散が相対的に大きくなってしまう。一方で、Lagrange 的手法の SPH 法[31,32]や Moving Particle Semi-implicit (MPS)法[33]は、上記問題に対していくつかの利点があるため広く用いられている。古典的な陽的 SPH 法を例にとれば、相互作用の部分は異なるが計算アルゴリズム自体は DEM と非常に類似している[34]。本法の利点としては、数値拡散が本質的に無いこと、明示的な界面追跡や複雑な接触角モデルを必要としないこと、高密度比・高粘性比に比較的対応できること、複雑な境界条件が容易に与えることが出来ることなどが挙げられる[35-37]。また、SPH モデルの別な優位性として、非常にシンプルな物理的解釈がある。Navier-Stokes 式は近似的に Newton 第 2 法則型の常微分方程式に還元でき、各物質間の pair-wise 型相互作用モデルを SPH モデルに組み入れることが容易であるため、新たな物理モデルを導入する場合、その開発努力を最小限に留めることができる[38]。Fig. 7 に充填層中を流下する液相挙動について弱圧縮性 MPS[39,40]を用いたシミュレーション結果の例を示す。本計算では、濡れ性の悪いコークス-溶銑を考慮するために固液間接触

角を 180 度としている。液相は充填粒子と衝突した後には分散しながら空隙を滴下する傾向が見られた。濡れの良い場合、固体表面を伝わりながら流下するが、本計算では充填構造のボトルネックとなる狭部に液滴として残留(ホールドアップ)することがわかる。このような液相物性と充填構造の解析によって炉下部現象を予測する試みがなされている[41]。

離散要素型解法は、周辺粒子検索など独特のルーチンを必要とするために従来の差分法等と比べて計算負荷が大きく、解析スケールに未だ大きな制約があり、また時間刻みも 1Mstep 程度要求される。しかし Graphics Processing Unit (GPU)を用いた高速化によってその制約は緩和されつつある。著者らの研究グループで安価な GPU (NVIDIA® GeForce GTX Titan)を利用して SPH 計算コードの高速化に取り組んだところ、単純な並列化のみで OpenMP を利用した現行ハイエンド CPU(core i7-5960X)よりも高速な計算が実行できた。そこで現行のハイエンド GPU TESLA-K80 を利用したマルチコア GPU 計算を行ったところ、ワークステーションレベルでも 10M 粒子オーダーの解析が可能となってきた。近年では、GPU スパコンを使用した 100M 粒子以上の大規模計算が

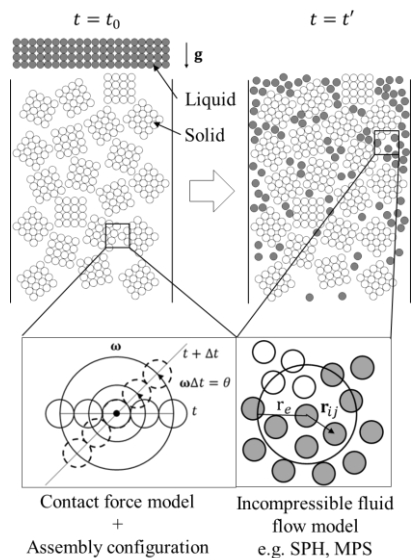


Fig. 6 Schematic diagram of numerical simulation of dripping behavior of droplet in packed bed using mesh-free Lagrange method.

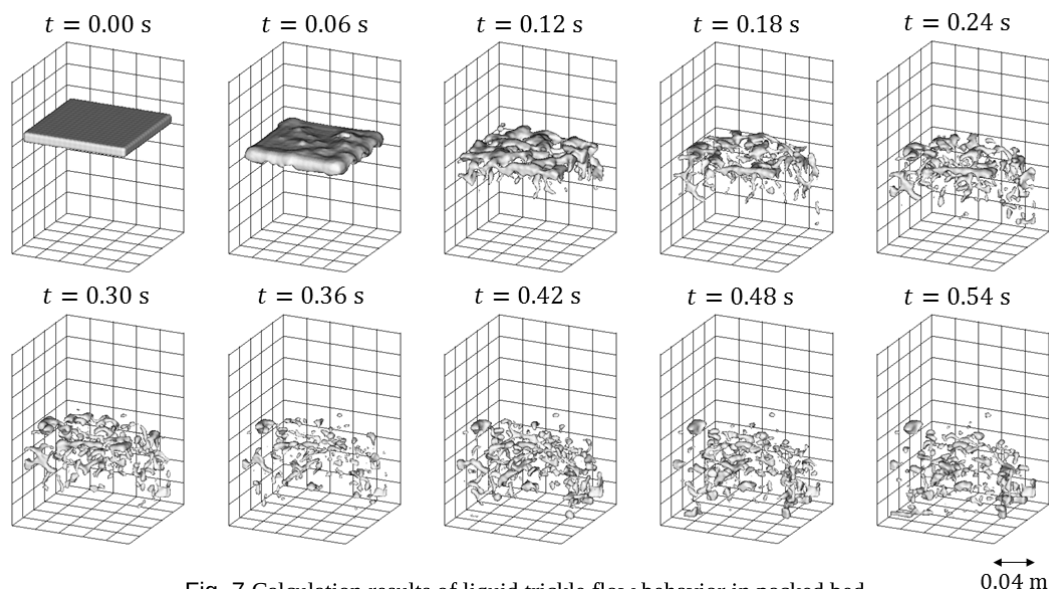


Fig. 7 Calculation results of liquid trickle flow behavior in packed bed.

実現された[42]。先に述べたとおり、モデル化技術開発と計算機能力の進歩は相俟っており、シミュレーション技術の発展には双方の継続した研究がなされていく必要がある。その意味では数値モデル研究は今後も発展の余地が広がっている。

4. 今後の展望

製鉄プロセスの離散要素法を中心とした数値シミュレーション法を紹介した。最近のモデル研究で、各相の素過程を同時に解くことができるようになってきており、また、今後も続くと思われる計算機技術の発展は、さらなる大規模演算を可能にしていくと考えられる。このような計算機資源の利用は、単なる実験や理論の補完にとどまらず、未知の現象を解析していくときの思考の基本となる。今後の経済事情を鑑みると、混合装入や高反応性原料利用に留まらず、様々な操業条件を視野に入れる必要があると思われ、経験に頼った勘所を押さえることが困難になる可能性が高い。ゆえに、各現象を区別することなく数値解析できるシミュレーション法を有し、炉内を非経験的かつ詳細に考察できれば、本法は学術的興味と新たなプロセス設計の強力なツールになるだろう。

今までの議論は固体粒子あるいはニュートン流体を対象とした力学計算であったが、より現実系への応用あるいは材料工学一般を考慮すると、

異相共存場のレオロジーが重要になってくると考えられる[43]。特に融着帯における鉱石の軟化現象の正確なモデリングは今後の課題であり、非 Newton 流体の正確なモデル化が期待される[44]。一方では、要素間をバネで連結した複雑形状を有する弾性体表現によるモデル化も行われている[45]。今後、DEM や SPH をベースとした多機能型モデルが多く開発され、より複雑な現象メカニズム解明へのさらなる進展が期待できる[46,47]。しかし、モデルの信頼性確立については多角的見解が必要となることは言うまでも無く、諸現象を今一度物理・化学的知見に基づいて見つめなおし、慎重な検討を進めていく視点が正確な現象理解に不可欠と思われる。

Nomenclature

C_p	: specific heat capacity	[kJ/kg · K]
$\mathbf{F}$	: force	[N]
$\mathbf{g}$	: gravity	[m/s ²]
I	: moment of inertia	[kg m ²]
k	: spring coefficient	[N/m]
l	: Relative displacement increment	[m]
m	: mass	[kg]
N	: number of particles	[-]
p	: pressure	[Pa]
Q	: quantity of heat	[kJ/s]
r	: radius	[m]

S	: generation rate	[kg/s]
T	: temperature	[K]
t	: time	[s]
$\mathbf{v}$	: velocity	[m/s]

Greek letters

Γ	: diffusion coefficient	[m ² /s]
ε	: void fraction	[-]
η	: dashpot coefficient	[-]
λ	: Heat conductivity	[W/m · K]
μ	: frictional coefficient	[-]
μ_g	: viscosity	[Pa · s]
ρ	: density	[kg/m ³]
ψ	: mass fraction	[-]
ω	: angular velocity	[/s]

Subscripts

c	: contact
f	: fluid
g	: gas phase
i, j	: particle index
n	: normal direction
r	: rotational
s	: shear direction
p	: particle

参考文献

- [1] Mousa, E. A., Babich, A. and Senk, D., Effect of Nut Coke-Sinter Mixture on the Blast Furnace Performance, ISIJ Int., Vol. 51(3), 350–358 (2011).
- [2] Jeong, I. H., Kim, H. S. and Sasaki, Y., Trickle Flow Behaviors of Liquid Iron and Molten Slag in the Lower Part of Blast Furnace. ISIJ Int., Vol. 53(12), 2090–209 (2013).
- [3] Mio, H., Komatsuki, S., Akashi, M., Shimosaka, A., Shirakawa, Y., Hidaka, J., Kadowaki, M., Yokoyama, H., Matsuzaki, S. and Kunitomo, K., Analysis of Traveling Behavior of Nut Coke Particles in Bell-type Charging Process of Blast Furnace by Using Discrete Element Method, ISIJ Int. Vol. 50(7), 1000–1009 (2010).
- [4] Mitra, T. and Saxén H., Discrete Element Simulation of Charging and Mixed Layer Formation in the Ironmaking Blast Furnace, Comput. Part. Mech., 1–15 (2015). (doi: 10.1007/s40571-015-0084-1)
- [5] Austin, P. R., Nogami and H. and Yagi, J., A Mathematical Model for Blast Furnace Reaction Analysis Based on the Four Fluid Model, ISIJ Int., Vol. 37(8), 748–755 (1997).
- [6] Cundall, A. and Strack, O. D. L., A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol. 29, 47–65 (1979).
- [7] Tsuji, Y., Kawaguchi, T. and Tanaka, T., Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed, Powder Technol., Vol. 77(1), 79–87 (1993).
- [8] Adema, A. T., Yang, Y. and Boom, R., Discrete Element Method-Computational Fluid Dynamic Simulation of the Materials Flow in an Ironmaking Blast Furnace, ISIJ Int., Vol. 50(7), 954–961 (2010).
- [9] Yuu, S., Umekage, T., Matsuzaki, S., Kadowaki, M. and Kunitomo, K., Large Scale Simulation of Coke and Iron Ore Particle Motions and Air Flow in Actual Blast Furnace, ISIJ Int., Vol. 50(7), 962–971 (2010).
- [10] Hou, Q. F., Samman, M., Li, J. and Yu, A. B., Modeling the Gas-Solid Flow in the Reduction Shaft of COREX, ISIJ Int., Vol. 54(8), 1772–1780 (2014).
- [11] Yang, W. J., Zhou, Z.Y. and Yu, A.B., Discrete Particle Simulation of Solid Flow in a Three-Dimensional Blast Furnace Sector Model, Chem. Eng. J. Vol. 278, 339–352 (2015).
- [12] Natsui, S., Nogami, H., Ueda, S., Kano, J., Inoue, R. and Ariyama, T., Simultaneous Three-Dimensional Analysis of Gas-Solid Flow in Blast Furnace by Combining Discrete Element Method and Computational Fluid Dynamics, ISIJ Int., Vol. 51(1), 41–50 (2011).
- [13] Ergun, S., Fluid Flow through Packed Columns, Chem. Eng. Prog., Vol. 48, 89–94 (1952).
- [14] Sakai, M., Numerical simulation of powder (in Japanese), Maruzen, Tokyo, (2012).
- [15] Ohta, M., Sakai, M., Shimada, N., Honma, S. and Matsukuma, Y., Numerical simulation of multi-phase flow (in Japanese), Maruzen, Tokyo, (2015).
- [16] Natsui, S., Shibasaki, R., Kon, T., Ueda, S., Inoue, R. and Ariyama, T., Effect of High Reactivity Coke Mixing in Iron Ore Bed on Each Particle Reaction Behavior in Blast Furnace, ISIJ Int., Vol. 53(10), 1770–1778 (2013).
- [17] Natsui, S., Kikuchi, T. and Suzuki, R. O., Numerical Analysis of Carbon Monoxide-Hydrogen Gas Reduction of Iron Ore in a Packed Bed by an Euler-Lagrange Approach, Metall. Mater. Trans. B, Vol. 45(6), 2395–2413 (2014).
- [18] Natsui, S., Blast Furnace Modeling by Euler-Lagrange Method, Materia Jpn, Vol. 54(9), 432–435 (2015).
- [19] Guo, X. and Zhu, Z., CFD Based Modeling on Chemical Looping Combustion in a Packed Bed Reactor, Chem. Eng. Sci., Vol. 138, 303–314 (2015).
- [20] Finn, J. and Apte, S. V., Relative Performance of Body Fitted and Fictitious Domain Simulations of Flow through Fixed Packed Beds of Spheres, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 56, 54–71 (2013).
- [21] Dixon, A. G., Taskin, M. E., Nijemeisland, M. and Stitt, E. H, CFD Method to Couple Three-

- Dimensional Transport and Reaction inside Catalyst Particles to the Fixed Bed Flow Field, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 49(19), 9012-9025 (2010).
- [22] Taskin, M. E., Troupel, A., Dixon, A. G., Nijemeisland, M. and Stitt, E. H., Flow, Transport, and Reaction Interactions for Cylindrical Particles with Strongly Endothermic Reactions, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 49(19), 9026-9037 (2010).
- [23] Kuroki, M., Ookawara, S. and Ogawa, K., A High-Fidelity CFD Model of Methane Steam Reforming in a Packed Bed Reactor, *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 42, S73-S78 (2009).
- [24] McGuire, N. E., Sullivan, N. P., Deutschmann, O., Zhu, H. and Kee, R. J., Dry Reforming of Methane in a Stagnation-Flow Reactor Using Rh Supported on Strontium-Substituted Hexaaluminate, *Appl. Catal. A Gene.*, Vol. 394(1), 257-265 (2011).
- [25] Wehinger, G. D., Eppinger, T. and Kraume, M., Detailed Numerical Simulations of Catalytic Fixed-Bed Reactors: Heterogeneous Dry Reforming of Methane, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 122, 197-209 (2015).
- [26] Wehinger, G. D., Heitmann, H. and Kraume, M., An Artificial Structure Modeler for 3D CFD Simulations of Catalytic Foams, *Chem. Eng. J.*, Vol. 284, 543-556 (2016).
- [27] Ueda, S. and T. Kon, Melting and Dripping Behaviors of Burden and Gas Flow in Blast Furnace, *Jpn. J. Multiphase Flow*, Vol. 30, in press., (2016).
- [28] Asai, M., Nijo, H. and Ito, K., Simulation of the Impingement of a Liquid Jet on a Molten Iron Bath by Using a Particle Method, *ISIJ Int.*, Vol. 49(2), 178-181 (2009).
- [29] Hirata, N., Coupling Simulation of Flow and Solidification Using MPS (Moving Particle Semi-Implicit) Metho, *Bull. ISIJ*, Vol. 19(11), 781-787 (2014).
- [30] Yuu, S. and Umekage, T., Simulation of Granular Flows and Piles Using SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics), *Bull. ISIJ*, Vol. 19(11), 802-808 (2014).
- [31] Lucy, L. B., A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis, *Astronomic. J.*, Vol. 82, 1013-1024 (1977).
- [32] Monaghan, J. J., Smoothed Particle Hydrodynamics, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, Vol. 30, 543-574 (1992).
- [33] Koshizuka, S. and Oka, Y., Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid., *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 123(3), 421-434 (1996).
- [34] Cleary, P. W., Prediction of Coupled Particle and Fluid Flows Using DEM and SPH, *Minerals Eng.*, Vol. 73, 85-99 (2015).
- [35] Natsui, S., Takai, H., Kumagai, T., Kikuchi, T. and Suzuki, R. O., Stable Mesh-Free Moving Particle Semi-Implicit Method for Direct Analysis of Gas-Liquid Two-Phase Flow, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 111, 286-298 (2014).
- [36] Natsui, S., Nashimoto, R., Takai, H., Kumagai, T., Kikuchi, T. and Suzuki, R. O., SPH Simulations of the Behavior of Two Immiscible Liquid Stirred by the Movement of a Gas Bubble, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 141, 342-355 (2016).
- [37] Bandara, U. C., Tartakovsky, A. M., Oostrom, M., Palmer, B. J., Grate, J. and Zhang, C., Smoothed Particle Hydrodynamics Pore-Scale Simulations of Unstable Immiscible Flow in Porous Media, *Adv. Water Resour.*, Vol. 62, 356-369 (2013).
- [38] Tartakovsky, A. M. and Panchenko, A, Pairwise Force Smoothed Particle Hydrodynamics Model for Multiphase Flow: Surface Tension and Contact Line Dynamics, *J. Comput. Phys.*, Vol. 305, 1119-1146 (2016).
- [39] Natsui, S., Kikuchi, T., Suzuki, R. O., Kon, T., Ueda, S. and Nogami, H., Characterization of Liquid Trickle Flow in Poor-wetting Packed Bed, *ISIJ Int.*, Vol. 55 (6), 1259-1266 (2015).
- [40] Natsui, S., Soda, R., Kon, T., Ueda, S., Kano, J., Inoue, R. and Ariyama, T., Wettability Model Considering Three-Phase Interfacial Energetics in Particle Method, *Mater. Trans.*, Vol. 53(4), 662-670 (2012).
- [41] Kon, T., Natsui, S., Ueda, S., Inoue, R. and Ariyama, T., Numerical Simulation of Dripping Behavior of Droplet in Packed Bed Using Particle Method, *ISIJ Int.*, Vol. 52(9), 1565-1573 (2012).
- [42] Tsuzuki, S. and T. Aoki, Large-scale Agitation Simulation Based on Distinct Element Method on GPU Supercomputer, *Comput. Mech. Conf.*, Vol. 2013(26), "1216-1"- "1216-3" (2013).
- [43] Kim, S. Y. and Sasaki, Y., Numerical Study Using Discrete Element Method about Coke Particle Behavior in Cohesive Zone, *ISIJ Int.*, Vol. 53(12), 2028-2037 (2013).
- [44] Itoh, K., Analysis of Metal Refining Processes by Using a Particle Method, *Materia Jpn*, Vol. 54(9), 436-439 (2015).
- [45] Ishihara, S., Zhang, Q. and Kano J., ADEM Simulation of Particle Breakage Behavior, *J. Soc. Powder Technol., Jpn.*, Vol. 51(6), 407-414 (2014).
- [46] Hilton, J. E. and Cleary, P. W., Raceway Formation in Laterally Gas-Driven Particle Beds, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 80, 306-316 (2012).
- [47] Gotoh, H. and Khayyer, A., Current Achievements and Future Perspectives for Projection-Based Particle Methods with Applications in Ocean Engineering, *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, 1-28 (2016).